

English translation of Abstract – DE 44 08 072 A1

A digital particle image velocimetry (DPIV) method for contactless measurements of three dimensional flow velocities comprising the steps of seeding a flow with tracer particles; repeatedly illuminating a plane-like interrogation volume of the seeded flow; projecting the repeatedly illuminated interrogation volume onto at least a photo sensor in a projection direction for recording pictures of the illuminated interrogation volume ; and determining the three dimensional flow velocities from the pictures of the repeatedly illuminated interrogation volume recorded by the photo sensor. The plane-like interrogation volume of the invention comprises at least two partial volumes positioned parallelly parallel to each other with regard to the projection direction. The step of repeatedly illuminating the interrogation volume comprises the step of illuminating the partial volumes in such a way that the pictures of different partial volumes are distinguishable from each other. The step of determining the three dimensional flow velocities of the flow comprises the steps of calculating a local autocorrelation function of a double exposed picture of the same partial volume, or calculating a local cross-correlation function between two separate pictures of the same partial volume, calculating a local-correlation function between two pictures of two different partial volumes, determining the sign of the out-of-plane component of the local flow velocities by using the location of peak of the local cross-correlation function between the two pictures of the two different partial volumes, and determining the magnitude of the out-of-plane component of the local flow velocities by using the peak heights of peaks of both local correlation functions.

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 44 08 072 A 1

⑳ Aktenzeichen: P 44 08 072.7
㉔ Anmeldetag: 10. 3. 94
㉕ Offenlegungstag: 3. 8. 95

㉖ Int. Cl.⁶:
G 01 P 5/20
G 01 P 3/38
G 01 C 11/06
H 04 N 3/10
H 04 N 5/225

DE 44 08 072 A 1

㉗ Innere Priorität: ㉘ ㉙ ㉚

01.02.94 DE 44 02 957.8

㉛ Anmelder:

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
e.V., 53111 Bonn, DE

㉜ Vertreter:

Rehberg, E., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 37085 Göttingen

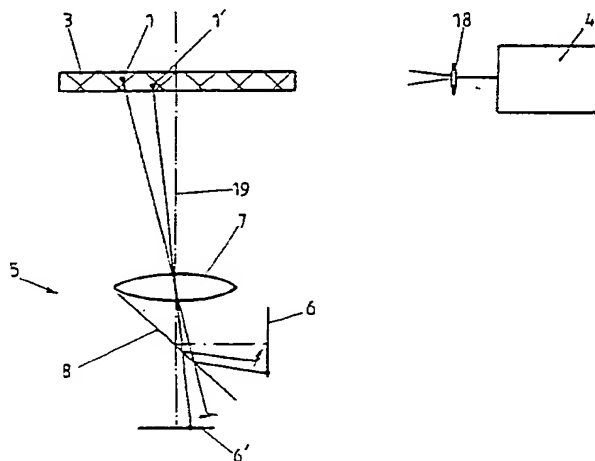
㉝ Erfinder:

Stasicki, Boleslaw, Dr., 37073 Göttingen, DE; Raffel,
Markus, Dr., 37077 Göttingen, DE; Kompenhans,
Jürgen, Dr., 37130 Gleichen, DE; Meier, Gerd E.A.,
Prof. Dr., 37077 Göttingen, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉞ Verwendung einer elektronischen Hochgeschwindigkeitskamera bei einem Verfahren zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten in einer Strömung

㉞ Eine elektronische Hochgeschwindigkeitskamera (5) weist ein optoelektronisches Aufnahmesystem mit einer Mehrzahl von getrennten Halbleiter-Bildsensoren (6) auf. Weiterhin ist ein das Bild des Objekts auf den Bildsensoren (6) abbildendes optisches Abbildungssystem vorgesehen. Dabei ist jedem Bildsensor (6) eine einzeln ansteuerbare elektronische Verschlusseinrichtung zugeordnet und jeder Bildsensor (6) an einen nachgeordneten Bildspeicher angeschlossen. Das Aufnahmesystem weist ein den Bildsensoren (6) gemeinsames Kameraobjektiv (7) und einen Strahlteiler (8) auf, der in der optischen Achse (19) des Kameraobjektivs (7) liegt. Die Bildsensoren (6) sind im Strahlengang des Kameraobjektivs (7) hinter dem Strahlteiler (8) angeordnet. Die Hochgeschwindigkeitskamera (5) wird bei einem Verfahren zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten in einer Strömung verwandt, wobei mehrere zeitlich aufeinander abfolgende Lichtschnitte durch eine mit Tracerpartikeln (1) geimpfte Strömung mit einem der Bildsensoren (6) aufgezeichnet werden und wobei die Strömungsgeschwindigkeiten in der Strömung durch Berechnung von Kreuzkorrelationen zwischen den einzelnen Abbildungen der Tracerpartikel (1) ermittelt werden.



DE 44 08 072 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 06.95 508 031/391

11/32

Die Erfindung bezieht sich auf eine neue Verwendung einer elektronischen Hochgeschwindigkeitskamera mit einem eine Mehrzahl von getrennten Halbleiter-Bildsensoren aufweisenden optoelektronischen Aufnahmesystem und einem das Bild des Objekts auf dem Bildsensoren abbildenden optischen Abbildungssystem, wobei jedem Bildsensor eine einzeln ansteuerbare elektronische Verschlusseinrichtung zugeordnet ist und jeder Bildsensor an einen nachgeordneten Bildspeicher angeschlossen ist, wobei das Aufnahmesystem ein den Bildsensoren gemeinsames Kameraobjektiv und einen Strahlteiler aufweist, der in der optischen Achse des Kameraobjektivs liegt, und wobei die Bildsensoren im Strahlengang des Kameraobjektivs hinter dem Strahlteiler angeordnet sind.

Eine solche Kamera ist aus der DE-PS 42 12 271 bekannt. Sie wird üblicherweise zur fotografischen Registrierung von schnell bewegten Objekten, einschließlich sichtbar gemachten Vorgängen, z. B. Strömungen, verwendet, um die schnell ablaufenden Bewegungen aufzulösen. Bei der bekannten Hochgeschwindigkeitskamera ist eine Mehrzahl von getrennten Halbleiter-Bildsensoren vorgesehen, die jeweils eine eigene elektronische Verschlusseinrichtung aufweisen, um auch mit elektronischen Bildsensoren sehr schnell aufeinander abfolgende Aufnahmen tätigen zu können.

Zur Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten in mit Tracerpartikeln geimpften Strömungen sind Verfahren der Particle-Image-Velocimetrie (PIV-Verfahren) bekannt. Dabei werden zwei zeitlich aufeinander abfolgende, dasselbe Teilvolumen erfassende Lichtschnitte durch die mit Tracerpartikeln geimpfte Strömung aufgezeichnet und hieraus die Geschwindigkeit der Tracerpartikel ermittelt. "Lichtschnitt" bedeutet dabei ein durch Beleuchtung hervorgehobenes, flächenhaftes, d. h. eine geringe Quererstreckung aufweisendes Teilvolumen der Strömung zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Für die vorliegende Erfindung sind die sogenannten digitalen PIV-Verfahren, bei denen die Auswertung der aufgezeichneten Lichtschnitte durch mathematische Verfahren erfolgt, von besonderem Interesse. Einmal ist dies durch Berechnung einer Autokorrelation einer beiden Lichtschnitte umfassenden, doppelt belichteten Aufnahme möglich. Hierbei bedarf es jedoch aufwendiger Maßnahmen, um das Vorzeichen der Geschwindigkeit der einzelnen Tracerpartikel zu ermitteln. Ein solches Verfahren wird beispielsweise in "Experiments in Fluids" Heft 10, 1991, Seiten 181 bis 193, beschrieben.

Das Vorzeichen der Geschwindigkeit der Tracerpartikel ergibt sich ohne weiteres, wenn die Kreuzkorrelation zwischen zwei separaten, jeweils einen Lichtschnitt umfassenden Aufnahmen berechnet wird. Bei einem derartigen Verfahren ist es aus "Proceedings: Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow, 14-16 July 1993", Seiten 648 bis 654, bekannt, eine hoch auflösende CCD-Kamera derart zu verwenden, daß der jeweils erste Lichtschnitt in das erste Halbbild und der jeweils zweite Lichtschnitt in das zweite Halbbild der CCD-Kamera fällt. Hiermit ist jedoch in nachteiliger Weise die Anwendung des Verfahrens auf vergleichsweise langsame Vorgänge beschränkt, da die beiden Halbbilder der CCD-Kamera nur mit der üblichen Videofrequenz aufeinander abfolgen. In der oben zitierten Beschreibung des bekannten Verfahrens wird darauf verwiesen, daß schnellere Vorgänge nur mit entsprechend schneller ge-

takteten Videokameras aufzuzeichnen sind, d. h. mit Videokameras, bei denen die Frequenz der Halbbilder höher ist als der übliche Videostandard. Hierbei ergibt sich jedoch zwangsläufig eine geringere Auflösung der aufgezeichneten Lichtschnitte, da die Frequenz der Halbbilder mit ihrem Kehrwert die Auslesezeit für die einzelnen Halbbilder bestimmt und in einer vorgegebenen Auslesezeit nur eine begrenzte Anzahl von Bildpunkten auslesbar ist.

Bei PIV-Verfahren ist generell eine möglichst hohe Auflösung anzustreben. Ein weiterer Nachteil des bekannten Verfahrens ist, daß beim Aufzeichnen von mehr als zwei Lichtschnitten hintereinander zusätzliche Beschränkungen hinsichtlich deren zeitlicher Abfolge auftreten.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten in einer Strömung, insbesondere ein digitales PIV-Verfahren, aufzuzeigen, bei dem die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit in der Strömung durch Kreuzkorrelationen vorzeicheneindeutig möglich ist und das keinerlei Beschränkungen hinsichtlich der Geschwindigkeiten in der beobachteten Strömung aufweist.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch die Verwendung der eingangs beschriebenen elektronischen Hochgeschwindigkeitskamera erreicht, wobei mehrere üblicherweise etwa senkrecht zur optischen Achse des Kameraobjektivs verlaufende und zeitlich aufeinander abfolgende Lichtschnitte durch eine mit Tracerpartikeln geimpfte Strömung mit jeweils einem der Bildsensoren aufgezeichnet werden und wobei die Strömungsgeschwindigkeit in der Strömung durch Berechnung von Kreuzkorrelationen zwischen den einzelnen Abbildungen der Tracerpartikel ermittelt werden. Für die vereinfachte Berechnung der Kreuzkorrelationen können die Bildsensoren dabei jeweils mit untereinander vernetzten Bildprozessoren verbunden sein. Die an sich bekannte Hochgeschwindigkeitskamera erlaubt mittlerweile eine Bildfrequenz von knapp unterhalb 10 MHz. Hiermit sind Strömungsgeschwindigkeiten auch in schnellsten Strömungen meßbar. Zudem können im strömungstechnischen Sinne gleichzeitig mit der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten andere Meßverfahren an der Strömung zum Einsatz gebracht werden. Beispielsweise kann alternierend eine laserinterferometrische Schwingungsmessung an einem umströmten Profil erfolgen. Dabei beeinträchtigen sich die beiden Meßverfahren nicht, da sie jeweils nacheinander durchgeführt werden.

Die Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera erlaubt bei einem digitalen PIV-Verfahren verschiedene Abwandlungen des bekannten Vorgehens. Sie ist aber auch bei anderen, an sich bekannten Verfahren zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten in einer Strömung, beispielsweise bei Verfahren der Speckleinterferometrie oder bei der Beobachtung von Mehrphasenströmungen vorteilhaft. Hier sind die Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls durch Kreuzkorrelationen zwischen einzelnen Aufzeichnungen der Strömung ermittelbar. Dabei entsprechen im Fall der Mehrphasenströmungen die Phasengrenzen den Tracerpartikel.

Für einfache erfindungsgemäße Anwendungen der Hochgeschwindigkeitskamera ist ein halbdurchlässiger Spiegel oder ein Strahlteilerprisma als Strahlteiler ausreichend. Im Fall des Strahlteilerprismas können die Bildsensoren direkt auf dieses aufgeklebt werden, wodurch deren Justierung vereinfacht ist. Unter Verwendung ei-

nes halbdurchlässigen Spiegels oder eines Strahlteilerprismas als Strahlteiler ist das Bild des Objekts allerdings nur auf zwei getrennte Bildsensoren abbildbar.

Breitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich, wenn der Strahlteiler des Aufnahmesystems der Hochgeschwindigkeitskamera eine Spiegelpyramide ist, die mit ihrer Pyramidenspitze dem Kameraobjektiv zugewandt ist, wobei die optische Achse der Spiegelpyramide mit der optischen Achse des Kameraobjektivs zusammenfällt und wobei die Spiegelpyramide eine Mehrzahl von jeweils einem der Bildsensoren zugeordneten Spiegelflächen aufweist. Dieser Aufbau der Hochgeschwindigkeitskamera entspricht demjenigen, wie er in der DE-PS 42 12 271 beschrieben ist. Durch entsprechende Ausbildung der Spiegelpyramide können problemlos 6 oder mehr Bildsensoren vorgesehen sein.

Bei der erfindungsgemäßen Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera kann ein und dasselbe Teilvolumen der Strömung von den aufeinander abfolgenden Lichtschnitten mehrfach erfaßt werden.

Diese Ausführungsform entspricht noch weitgehend einem üblichen Vorgehen bei PIV-Verfahren, bei dem ein und dasselbe Teilvolumen der Strömung doppelt belichtet wird. Mit der Hochgeschwindigkeitskamera sind jedoch problemlos auch drei oder mehr direkt aufeinander folgende Abbildungen desselben Teilvolumens möglich, was insbesondere bei instationären Strömungen von Interesse ist.

In einer ersten Abwandlung zu den bekannten PIV-Verfahren können verschiedene, in Richtung der optischen Achse des Kameraobjektivs hintereinander liegende Teilvolumina der Strömung von den Lichtschnitten jeweils mehrfach erfaßt werden. Hiermit ist die Beobachtung der Strömung in verschiedenen Ebenen mit ein und derselben Hochgeschwindigkeitskamera möglich. Dieses Vorgehen wird durch eine große Tiefenschärfe des Kameraobjektivs erleichtert.

In einer sich bereits deutlich von den bekannten PIV-Verfahren abkehrenden Ausführungsform werden in Richtung der optischen Achse des Kameraobjektivs benachbarte oder sich teilweise überdeckende Teilvolumina der Strömung von den aufeinander abfolgenden Lichtschnitten nacheinander erfaßt. Die Kreuzkorrelationen zwischen den einzelnen Abbildungen beinhalten dabei zusätzlich Informationen über Geschwindigkeitskomponenten der Strömung parallel zur optischen Achse des Kameraobjektivs. Konkret können diese Strömungsgeschwindigkeiten, die mit herkömmlichen PIV-Verfahren nicht ermittelbar sind, auf einfache Weise aus den Peakintensitäten der Kreuzkorrelationen berechnet werden.

Wenn die in Richtung der optischen Achse des Kameraobjektivs benachbarten oder sich teilweise überdeckenden Teilvolumina der Strömung von den Lichtschnitten wechselweise erfaßt werden, sind durch die Kreuzkorrelationen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Strömung parallel zur optischen Achse des Kameraobjektivs unabhängig davon ermittelbar, ob diese Geschwindigkeitskomponente positives oder negatives Vorzeichen hat, d. h. vom Kameraobjektiv weg oder auf dieses zu verläuft.

Bei unzureichender Tiefenschärfe des Kameraobjektivs ist es für eine scharfe Abbildung der in Richtung der optischen Achse des Kameraobjektivs hintereinander liegenden, benachbarten oder sich teilweise überdeckenden Teilvolumina der Strömung sinnvoll, die optischen Abstände der jeweiligen Bildsensoren zu dem Kameraobjektiv einzeln abzustimmen. Danach weisen die

demselben Teilvolumen zugeordneten Bildsensoren jeweils denselben optischen Abstand zu dem Kameraobjektiv auf, während die verschiedenen, unterschiedlichen Teilvolumina zugeordneten Bildsensoren jeweils verschiedene optische Abstände zu dem Kameraobjektiv aufweisen.

Um unnötige Schwierigkeiten bei der Berechnung der Kreuzkorrelationen zu vermeiden, ist es erforderlich, daß alle Bildsensoren, zwischen deren Aufzeichnungen Kreuzkorrelationen zu berechnen sind, in optisch drehäquivalenten Stellungen relativ zu der optischen Achse des Kameraobjektivs angeordnet sind.

Hinsichtlich der Ausleuchtung der einzelnen Lichtschnitte können die Bildsensoren mit pulsaren Lichtquellen zur Ausleuchtung der von den einzelnen Lichtschnitten erfaßten Teilvolumina der Strömung synchronisiert sein. Dabei wird mit der Lichtquelle der Zeitpunkt jedes Lichtschnitts festgelegt. Daneben ist es durch die Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera auch möglich, die von den Lichtschnitten erfaßten Teilvolumina der Strömung dauerhaft auszuleuchten, wobei für hintereinander liegende Teilvolumina voneinander unterscheidbare Lichtarten zu verwenden sind. Dabei wird der Zeitpunkt jedes Lichtschnitts durch die Öffnung der elektronischen Verschlusseinrichtung des zugeordneten Bildsensors festgelegt. Als unterscheidbare Lichtarten sind beispielsweise Lichtarten mit unterschiedlicher Polarisierung oder Farbe geeignet, wobei die einzelnen Lichtarten durch entsprechende Filter leicht voneinander trennbar sind. Sofern bei einer dauerhaften Ausleuchtung der Teilvolumina Probleme hinsichtlich der Lichtintensität bei kurzen Verschlusszeiten entstehen, können die Verschlusseinrichtungen der einzelnen Bildsensoren als Bildverstärker ausgebildet sein. Bekannte Bildverstärker sind ihrer grundsätzlichen Funktion nach gleichzeitig als Verschlusseinrichtungen für kurzzeitige Belichtungen geeignet.

Die Hochgeschwindigkeitskamera zur Verwendung bei einem Verfahren zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten in einer Strömung, mit einem eine Mehrzahl von getrennten Halbleiter-Bildsensoren aufweisenden optoelektronischen Aufnahmesystem und einem das Bild des Objekts auf den Bildsensoren abbildenden optischen Abbildungssystem, wobei jedem Bildsensor eine einzeln ansteuerbare elektronische Verschlusseinrichtung zugeordnet ist und jeder Bildsensor an einen nachgeordneten Bildspeicher angeschlossen ist, wobei das Aufnahmesystem ein den Bildsensoren gemeinsames Kameraobjektiv und einen Strahlteiler aufweist, der in der optischen Achse des Kameraobjektivs liegt, und wobei die Bildsensoren im Strahlengang des Kameraobjektivs hinter dem Strahlteiler angeordnet sind ist ihrerseits erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, daß der optische Abstand der einzelnen Bildsensoren zu dem Kameraobjektiv verstellbar ist, so daß für verschiedene, unterschiedlichen Teilvolumina der Strömung zugeordnete Bildsensoren verschiedene optische Abstände zu dem Kameraobjektiv einstellbar sind. Durch diese Weiterentwicklung ist die bekannte Hochgeschwindigkeitskamera besser zur Beobachtung der Strömung in verschiedenen, hintereinander liegenden Teilvolumina und zur Bestimmung der dritten Geschwindigkeitskomponente der Strömung parallel zur optischen Achse des Kameraobjektivs geeignet. Dabei ermöglicht die Weiterentwicklung, die einzelnen Bildsensoren für unterschiedliche Objektentfernungen zu dem Kameraobjektiv scharf zu stellen.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführ-

rungsbeispielen eines PIV-Verfahrens näher erläutert und beschrieben. Es zeigt:

Fig. 1 einen Aufbau zur Durchführung des PIV-Verfahrens mit einer Hochgeschwindigkeitskamera,

Fig. 2 die prinzipielle Durchführung des PIV-Verfahrens in einer ersten Ausführungsform,

Fig. 3 einen Schnitt durch eine gemäß Fig. 2 ermittelte Kreuzkorrelationsebene,

Fig. 4 die prinzipielle Durchführung des PIV-Verfahrens in einer zweiten Ausführungsform,

Fig. 5 Schnitte durch drei gemäß Fig. 4 ermittelte Kreuzkorrelationsebenen und

Fig. 6 die prinzipielle Durchführung des PIV-Verfahrens in einer dritten Ausführungsform.

Die in Fig. 1 dargestellte Anordnung dient zur Durchführung eines Verfahrens der Particel-Image-Velocimetrie bei einer mit Tracerpartikeln 1 geimpften Strömung 2. Ein flächenhaftes Teilvolumen 3 der Strömung wird durch eine Lichtquelle 4 ausgeleuchtet, der eine hier nicht näher dargestellte Lichtschnittoptik zugeordnet ist. Die Lichtschnittoptik beschränkt die Ausleuchtung der Strömung 2 auf das Teilvolumen 3, bei dem es sich um eine Ebene mit geringer Querausdehnung handelt. Zur Aufzeichnung von Lichtschnitten durch die Strömung 2 ist eine Hochgeschwindigkeitskamera 5 vorgesehen. Lichtschnitt bedeutet dabei das durch Beleuchtung hervorgehobene, flächenhafte Teilvolumen 3 der Strömung 2 zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Hochgeschwindigkeitskamera 5 weist eine Mehrzahl von getrennten Halbleiter-Bildsensoren 6 auf, von denen hier zwei dargestellt sind. Das Teilvolumen 3 wird auf die Bildsensoren 6 über ein Kameraobjektiv 7 und einen Strahlteiler 8 abgebildet. Der Strahlteiler ist hier als Spiegelpyramide ausgebildet, die mit ihrer Pyramiden-
spitze dem Kameraobjektiv zugewandt ist und die so viele Spiegelflächen aufweist, wie Bildsensoren 6 vorgesehen sind. Jeder Bildsensor ist Bestandteil einer separaten CCD-Kamera 9 und weist somit eine eigene, einzeln ansteuerbare elektronische Verschlusseinrichtung auf. Jedem Bildsensor 6 ist weiterhin ein Bildspeicher 10 zugeordnet, an den die jeweilige CCD-Kamera ein Videosignal 11 und ein Triggersignal 12 weitergibt. Die Bildspeicher 10 sind wiederum mit einem Bildprozessor 13 verbunden, der zur Ermittlung von Kreuzkorrelationen zwischen den von den einzelnen Bildsensoren aufgezeichneten Bildern dient. Bei dem Bildprozessor 13 handelt es sich vorzugsweise um einen Rechner und er weist einen Monitor 14 auf. Daneben sind zwei Ausgänge 15, beispielsweise für einen Drucker, vorgesehen. Die Ansteuerung der Verschlusseinrichtungen der CCD-Kameras 9 erfolgt über eine Ablaufsteuerung 16, die synchron mit den Verschlusseinrichtungen die Lichtquelle 4 betätigt, sofern es sich dabei nicht um eine das Teilvolumen 3 permanent ausleuchtende Lichtquelle handelt. Die Ablaufsteuerung 16 weist einen Eingang 17 für ein externes Triggersignal auf.

Mit der Hochgeschwindigkeitskamera 5 werden aufeinander abfolgende Lichtschnitte durch die Strömung 2 getrennt voneinander aufgezeichnet. Zwischen den einzelnen Abbildungen der Tracerpartikel 1 in den Lichtschnitten werden mit dem Bildprozessor 13 Kreuzkorrelationen berechnet, aus denen sich die Strömungsgeschwindigkeiten der Strömung 2 ergeben. Die Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera erlaubt dabei die schnelle Abfolge von mehreren Lichtschnitten hintereinander. Dabei mögliche Ausführungsformen des PIV-Verfahrens werden im folgenden einzeln erläutert.

Fig. 2 zeigt die einfachste Ausführungsform des PIV-

Verfahrens unter Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera 5, die hier als Strahlteiler 8 einen halbdurchlässigen Spiegel aufweist. Die Lichtquelle 4 leuchtet über die Lichtschnittoptik 18 das Teilvolumen 3 der hier nicht weiter dargestellten Strömung dauerhaft aus. Die Hochgeschwindigkeitskamera 5 ist mit der optischen Achse 19 des Kameraobjektivs 7 senkrecht zu den Haupterstreckungsrichtungen des Teilvolumens 3 ausgerichtet. Durch den im Strahlengang hinter dem Kameraobjektiv 7 angeordneten Strahlteiler 8 wird das Teilvolumen 3 auf beide Bildsensoren 6 und 6', bei denen es sich um hochauflösende Videochips handelt, abgebildet. Durch die den Videochips 6 und 6' zugeordneten, hier jedoch nicht separat dargestellten, elektronischen Verschlusseinrichtungen werden die Zeitpunkte von zwei aufeinanderfolgenden Lichtschnitten festgelegt. Zum Zeitpunkt des ersten Lichtschnitts ist der Bildsensor 6 aktiv und der einzeln dargestellte Tracerpartikel befindet sich am Punkt 1. Zum Zeitpunkt des zweiten Lichtschnitts ist der Bildsensor 6' aktiv und der Tracerpartikel befindet sich am Punkt 1'. Da sich die beiden Bildsensoren in drehäquivalenten Stellungen zu der optischen Achse 19 des Kameraobjektivs befinden, können aus den beiden aufgezeichneten Lichtschnitten die Strömungsgeschwindigkeiten in dem Teilvolumen 3 unmittelbar bestimmt werden. Hierzu ist die Kreuzkorrelation zwischen den beiden separaten Aufnahmen zu berechnen. Einen Schnitt 20 durch die Kreuzkorrelationsebene zeigt Fig. 3. Dabei gibt die Lage des Peaks 21 Betrag und Vorzeichen der zu dem Schnitt gehörigen Strömungsgeschwindigkeit an.

Mit der in Fig. 4 dargestellten Ausführungsform des PIV-Verfahrens ist es darüberhinaus möglich, Strömungsgeschwindigkeiten parallel zur optischen Achse 19 des Kameraobjektivs 7 zu bestimmen. Dazu werden aufeinander abfolgende Lichtschnitte mit der Hochgeschwindigkeitskamera 5 aufgezeichnet, die abwechselnd zwei hintereinander angeordnete, sich teilweise überdeckende Teilvolumina 3 und 3' der Strömung erfassen. Die Lichtquelle, bei der es sich hier um einen Puls laser handelt, ist mit den Bildsensoren 6, 6' und 6'' der Hochgeschwindigkeitskamera 5 entsprechend synchronisiert und leuchtet für einen ersten, vom Bildsensor 6 auf zu zeichnenden Lichtschnitt das Teilvolumen 3, für einen zweiten vom Bildsensor 6' aufzuzeichnenden Lichtschnitt das Teilvolumen 3' und für einen dritten, vom Bildsensor 6'' aufzuzeichnenden Lichtschnitt wieder das Teilvolumen 3 aus.

Dabei können die Bildsensoren 6, 6' und 6'' hinter dem hier nur schematisch angedeuteten Strahlteiler 8 mit unterschiedlichem Abstand zu dem Kameraobjektiv 7 angeordnet sein. D. h., daß zwar die Bildsensoren 6 und 6'' denselben Abstand zu dem Kameraobjektiv 7 aufweisen, daß aber der Bildsensor 6' der geringeren Objektentfernung entsprechend etwas weiter vom Kameraobjektiv entfernt angeordnet ist. Diese unterschiedlichen Entfernungen sind nicht erforderlich, falls das Kameraobjektiv eine ausreichende Tiefenschärfe aufweist und die Teilvolumina 3 und 3' bei gleicher Stellung des Bildsensors 6 auf diesem scharf abgebildet werden. Wenn der einzeln dargestellte Tracerpartikel sich zum Zeitpunkt des ersten Lichtschnitts am Punkt 1, des zweiten Lichtschnitts am Punkt 1' und des dritten Lichtschnitts am Punkt 1'' befindet, finden sich Abbildungen des Tracerpartikels nur in der Aufnahme des ersten Lichtschnitts mit dem Bildsensor 6 und des zweiten Lichtschnitts mit dem Bildsensor 6'.

Hieraus ergeben sich die in Fig. 5 dargestellten

Schnitte durch die verschiedenen Kreuzkorrelationsebenen, wobei Fig. 5a zur Kreuzkorrelationsebene zwischen dem ersten und dem zweiten Lichtschnitt, Fig. 5b zu der Kreuzkorrelationsebene zwischen dem zweiten und dem dritten Lichtschnitt und Fig. 5c zur Kreuzkorrelationsebene zwischen dem ersten und dem dritten Lichtschnitt gehört. Der Peak 21 des Schnitts 20 gemäß Fig. 5a zeigt mit seiner Lage das Vorzeichen und den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit, die dem Schnitt durch die Kreuzkorrelationsebene entspricht und die in die Haupterstreckungsebene der Teilvolumina 3 und 3' fällt, an. Aus der Intensität des Peaks ist zu entnehmen, wie häufig zwischen dem ersten und dem zweiten Lichtschnitt Tracerpartikel 1 aus dem ersten in das zweite Teilvolumen gewechselt sind. Hieraus ergibt sich unmittelbar der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit der Strömung in Richtung der optischen Achse 19 des Kameraobjektivs 7. Das Vorzeichen dieser Strömungsgeschwindigkeit ist unter Berücksichtigung der Anordnung der beiden Teilvolumina 3 und 3' ermittelbar. Eine Gegenkontrolle ermöglicht Fig. 5b, die keinen Peak zeigt, obwohl die zugehörigen Lichtschnitte dieselben Teilvolumina betreffen. Dies ist auf die andere zeitliche Reihenfolge der Lichtschnitte zurückzuführen, die beim Auftreten eines Peaks einer umgekehrten Strömungsrichtung entspräche. Fig. 5c zeigt ebenfalls keinen Peak bei dem Schnitt 20'', weil die Geschwindigkeitskomponente der Strömung parallel zur optischen Achse 19 des Kameraobjektivs 7 vergleichsweise groß ist und den Kreuzkorrelationen nur der dargestellte Tracerpartikel zugrundeliegt. Bei einer Vielzahl von Tracerpartikeln mit unterschiedlichen Startpunkten in dem ersten Lichtschnitt würden auch in den Fig. 5b und 5c Peaks auftreten, da sich ein Teil der Tracerpartikel nicht nur zum Zeitpunkt des ersten Lichtschnitts sondern auch noch zum Zeitpunkt des dritten Lichtschnitts in dem Teilvolumen 3 befände. Die berechneten Kreuzkorrelationen liefern dabei durch die Intensität der Peaks ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit innerhalb der beteiligten Lichtschnitte. Diese hängen unmittelbar von der Geschwindigkeitskomponente der Tracerpartikel 1 quer zu den jeweiligen Teilvolumina 3, 3' ab. Durch Verkürzen des Zeitabstands zwischen dem ersten und dem dritten Lichtschnitt läßt sich auch bei sehr schnellen Strömungen und einer geringen Partikeldichte ein auswertbarer Peak bei den Schnitten durch die Korrelationsebenen gemäß den Fig. 5b und 5c erreichen, dessen Lage dabei einer Geschwindigkeit in der Haupterstreckungsrichtung des Teilvolumens 3 entspricht. Eine andere Anpassungsmöglichkeit an die Strömung stellt der seitliche Abstand der Teilvolumina 3, 3' in Richtung der optischen Achse 19 dar.

Die Ausführungsform des PIV-Verfahrens gemäß Fig. 6 entspricht weitgehend derjenigen gemäß Fig. 2. Hier sind die Bildsensoren 6 jedoch seitlich versetzt zur optischen Achse 19 des Kameraobjektivs 7 angeordnet, so daß bei vier zeitlich aufeinanderabfolgenden Lichtschnitten der dargestellte Tracerpartikel zunächst von einem hier zusammengefaßt wiedergegebenen Bildsensorenpaar 6, 6' und dann von einem zweiten Bildsensorenpaar 6'', 6''' aufgezeichnet wird. D. h., zum Zeitpunkt des ersten Lichtschnitts wird der Tracerpartikel 1 auf den Bildsensor 6 abgebildet, zum Zeitpunkt des zweiten Lichtschnitts wird derselbe Tracerpartikel 1' auf den Bildsensor 6' abgebildet usw. Hierbei überschneiden sich die beiden Bildbereiche der Bildsensorenpaare 6, 6' und 6'', 6''' nicht. Auf diese Weise ist bei gleicher nomineller Auflösung der Bildsensoren im Vergleich zu den

vorhergegangenen Ausführungsbeispielen des PIV-Verfahrens die lokale Auflösung verbessert, da die einzelnen Bildsensoren nur zur Aufzeichnung eines eng begrenzten Ausschnitts aus dem Teilvolumen 3 verwendet werden. Bei einer Strömung mit zusätzlicher Strömungskomponente parallel zur optischen Achse 19 des Kameraobjektivs 7 kann es auch sinnvoll sein, das zweite Paar der Bildsensoren 6'', 6''' einem anderen Teilvolumen, wie beispielsweise dem Teilvolumen 3' gemäß Fig. 4, zuzuordnen. Dann wären die Beobachtungsbereiche der beiden Bildsensorenpaare 6, 6' bzw. 6'', 6''' sowohl quer als auch in Richtung der optischen Achse 19 des Kameraobjektivs 7 versetzt zueinander angeordnet. Die konkrete Anordnung der Beobachtungsbereiche ist bei der Auswertung der einzelnen Kreuzkorrelationen zwischen den Lichtschnitten genau zu berücksichtigen.

Durch Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera bei den geschilderten PIV-Verfahren sind auch schnellste Strömungen vollständig erfassbar und hinsichtlich ihrer lokalen Strömungsgeschwindigkeiten in allen drei Komponenten auswertbar.

Bezugszeichenliste

- 1 Tracerpartikel
- 2 Strömung
- 3 Teilvolumen
- 4 Lichtquelle
- 5 Hochgeschwindigkeitskamera
- 6 Bildsensor
- 7 Kameraobjektiv
- 8 Strahlteiler
- 9 CCD-Kamera
- 10 Bildspeicher
- 11 Videosignal
- 12 Triggersignal
- 13 Bildprozessor
- 14 Monitor
- 15 Ausgang
- 16 Ablaufsteuerung
- 17 Eingang
- 18 Lichtschnittoptik
- 19 optische Achse
- 20 Schnitt
- 21 Peak

Patentansprüche

1. Verwendung einer elektronischen Hochgeschwindigkeitskamera (5) mit einem eine Mehrzahl von getrennten Halbleiter-Bildsensoren (6) aufweisenden optoelektronischen Aufnahmesystem und einem das Bild des Objekts auf den Bildsensoren (6) abbildenden optischen Abbildungssystem, wobei jedem Bildsensor (6) eine einzeln ansteuerbare elektronische Verschlußeinrichtung zugeordnet ist und jeder Bildsensor (6) an einen nachgeordneten Bildspeicher (10) angeschlossen ist, wobei das Aufnahmesystem ein den Bildsensoren (6) gemeinsames Kameraobjektiv (7) und einen Strahlteiler (8) aufweist, der in der optischen Achse (19) des Kameraobjektivs (7) liegt, und wobei die Bildsensoren (6) im Strahlengang des Kameraobjektivs (7) hinter dem Strahlteiler (8) angeordnet sind, bei einem Verfahren zum Bestimmen von Strömungsgeschwindigkeiten in einer Strömung, wobei mehrere zeitlich aufeinander abfolgende Lichtschnitte durch

die mit Tracerpartikeln (1) geimpfte Strömung (2) mit jeweils einem der Bildsensoren (6) aufgezeichnet werden und wobei die Strömungsgeschwindigkeiten in der Strömung (2) durch Berechnung von Kreuzkorrelationen zwischen den einzelnen Abbildungen der Tracerpartikel (1) ermittelt werden. 5

2. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Strahlteiler (8) ein halbdurchlässiger Spiegel oder ein Strahlteilerprisma ist. 10

3. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Strahlteiler (8) eine Spiegelpyramide ist, die mit ihrer Pyramidenspitze dem Kameraobjektiv (7) zugewandt ist, wobei die optische Achse der Spiegelpyramide mit der optischen Achse (19) des Kameraobjektivs (7) zusammenfällt und wobei die Spiegelpyramide eine Mehrzahl von jeweils einem der Bildsensoren (6) zugeordneten Spiegelflächen aufweist. 15

4. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein und dasselbe Teilvolumen (3) der Strömung (2) von den aufeinander abfolgenden Lichtschnitten mehrfach erfaßt wird. 20

5. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß verschiedene, in Richtung der optischen Achse des Kameraobjektivs hintereinanderliegende Teilvolumina (3, 3') der Strömung (2) von den Lichtschnitten jeweils mehrfach erfaßt werden. 25

6. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß in Richtung der optischen Achse des Kameraobjektivs (19) benachbarte oder sich teilweise überdeckende Teilvolumina (3, 3') der Strömung (2) von den aufeinander abfolgenden Lichtschnitten nacheinander erfaßt werden, wobei die Strömungsgeschwindigkeiten parallel zur optischen Achse (19) des Kameraobjektivs (7) aus den Peakintensitäten der Kreuzkorrelationen berechnet werden. 30

7. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die benachbarten oder sich teilweise überdeckenden Teilvolumina (3, 3') der Strömung (2) durch die aufeinander abfolgenden Lichtschnitte wechselweise erfaßt werden. 35

8. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß verschiedene einem Teilvolumen (3) zugeordnete Bildsensoren (6) denselben optischen Abstand zu dem Kameraobjektiv (7) aufweisen und daß verschiedene, unterschiedlichen Teilvolumina (3, 3') zugeordnete Bildsensoren (6) jeweils verschiedene optische Abstände zu dem Kameraobjektiv (7) aufweisen. 40

9. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildsensoren (6) in optisch drehäquivalenten Stellungen relativ zu der optischen Achse (19) des Kameraobjektivs (7) angeordnet sind. 45

10. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildsensoren (6) mit puls- 50

baren Lichtquellen (4) zur Belichtung der von den einzelnen Lichtschnitten erfaßten Teilvolumina (3, 3') synchronisiert sind. 55

11. Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die von den Lichtschnitten erfaßten Teilvolumina (3, 3') der Strömung (2) dauerhaft ausgeleuchtet werden, wobei für hintereinanderliegende Teilvolumina voneinander unterscheidbare Lichtarten verwendet werden.

12. Hochgeschwindigkeitskamera zur Verwendung bei einem Verfahren zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten in einer Strömung, mit einem eine Mehrzahl von getrennten Halbleiter-Bildsensoren aufweisenden optoelektronischen Aufnahmesystem und einem das Bild des Objekts auf den Bildsensoren abbildenden optischen Abbildungssystem, wobei jedem Bildsensor eine einzeln ansteuerbare elektronische Verschlusseinrichtung zugeordnet ist und jeder Bildsensor an einen nachgeordneten Bildspeicher angeschlossen ist, wobei das Aufnahmesystem ein den Bildsensoren gemeinsames Kameraobjektiv und einen Strahlteiler aufweist, der in der optischen Achse des Kameraobjektivs liegt, und wobei die Bildsensoren im Strahlengang des Kameraobjektivs hinter dem Strahlteiler angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Abstand der einzelnen Bildsensoren (6) zu dem Kameraobjektiv (7) verstellbar ist, so daß für verschiedene, unterschiedlichen Teilvolumina (3, 3') der Strömung (2) zugeordnete Bildsensoren (6) verschiedene optische Abstände zu dem Kameraobjektiv (7) einstellbar sind.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

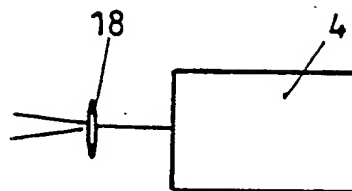
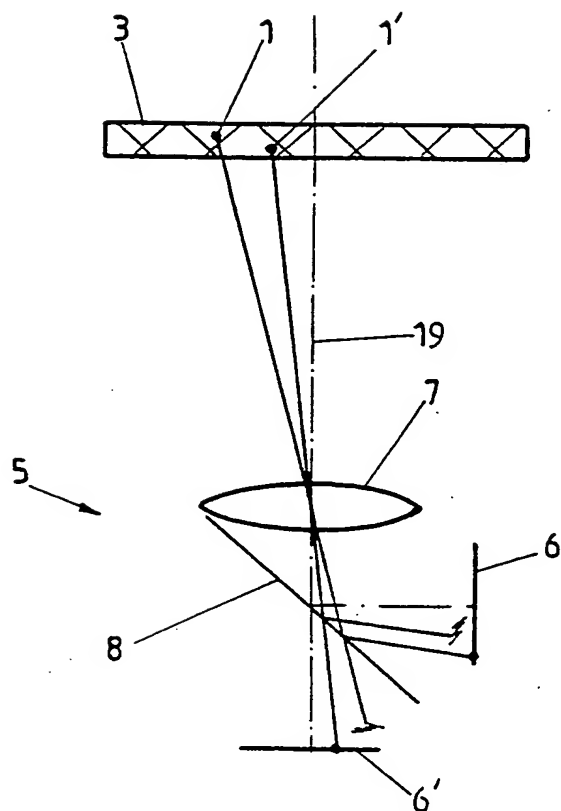


Fig. 2 *

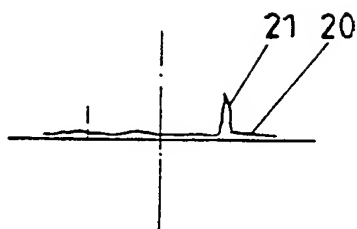


Fig. 3

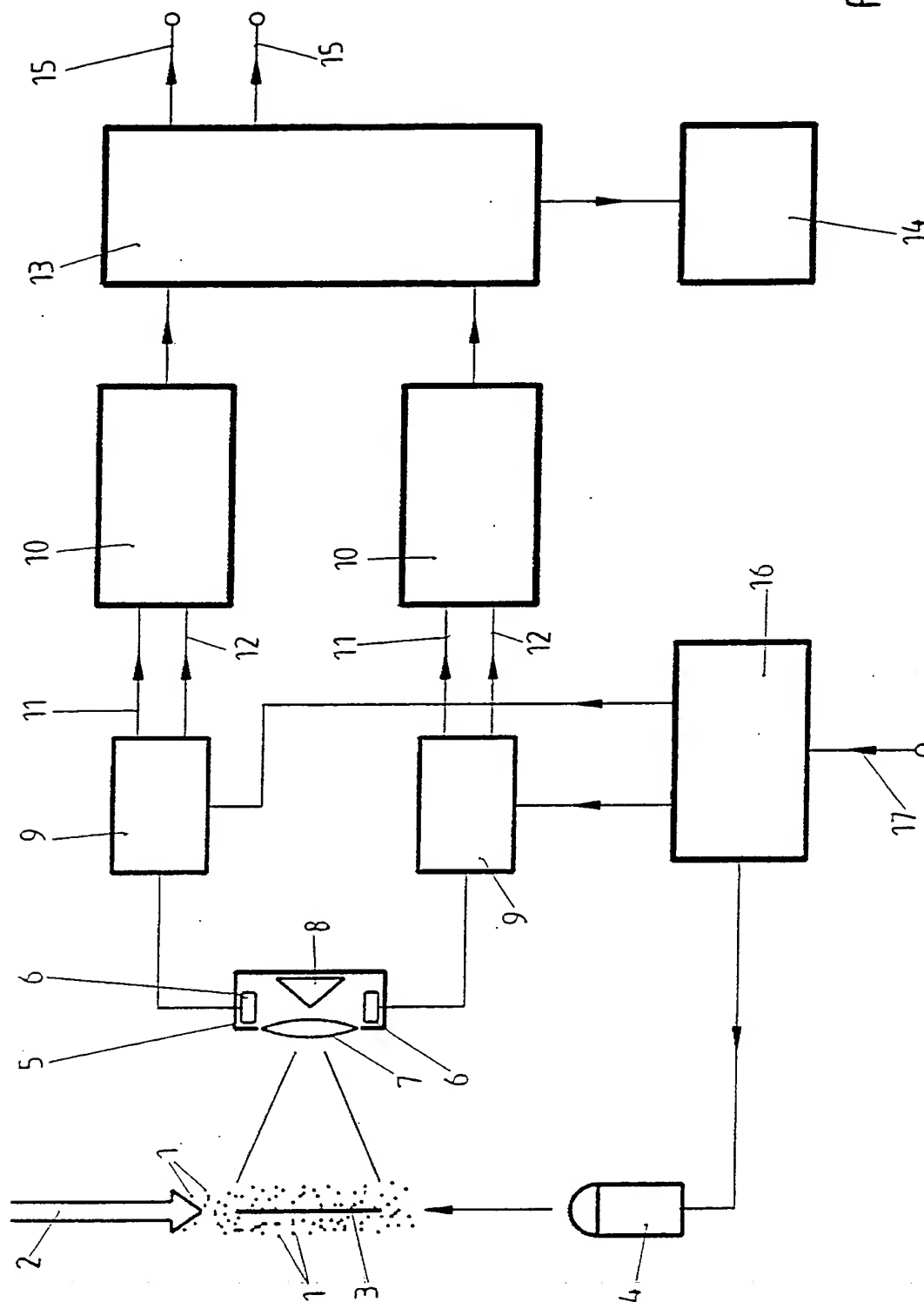


Fig.1

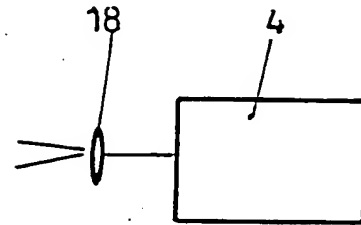
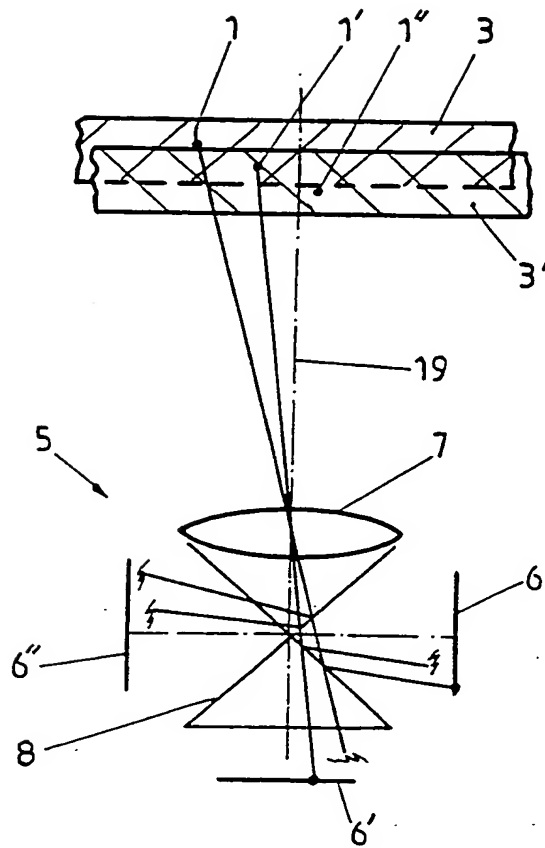


Fig. 4

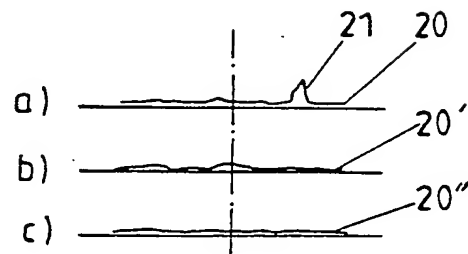


Fig. 5

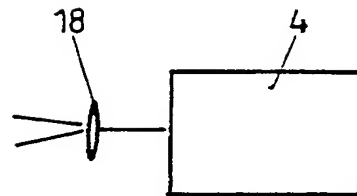
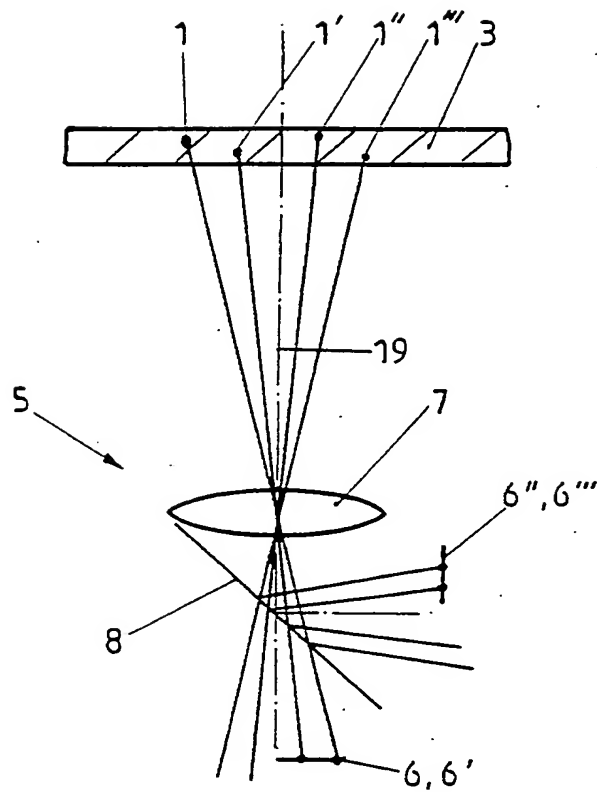


Fig. 6